

НОВЫЕ ИСТОЧНИКИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ**В. А. Цукерман, Л. В. Тарасова, С. И. Лобов****СОДЕРЖАНИЕ**

1. Импульсные рентгеновские источники с автоэлектронной эмиссией	320
2. Генераторы мощных импульсов тормозного рентгеновского излучения	325
3. Генерирование рентгеновского излучения при импульсных разрядах в воздухе и других газах	328
4. Радиоактивные источники рентгеновских и гамма-лучей низкой энергии	330
Цитированная литература	335

В 1970 г. исполнилось 75 лет со времени открытия рентгеновских лучей — одного из самых замечательных достижений экспериментальной физики прошлого столетия. Общеизвестно огромное влияние, которое оказало это открытие на развитие физики XX века, а также на медицинскую диагностику, радиационную генетику, лучевую терапию и многие другие области науки и техники.

Широкое использование рентгеновских лучей в разнообразных физических и прикладных задачах стимулировало непрерывное совершенствование существующих и поиск новых источников этого излучения. На протяжении первых двух десятилетий (1895—1915 гг.) источники рентгеновских лучей, применяемые в физике и медицине, по принципу действия мало отличались от трубок, предложенных самим Рентгеном. Они представляли собой газоразрядные приборы, работающие на левой ветви кривой Пашена при давлениях остаточных газов около 10^{-3} тор. Источником быстрых электронов в таких трубках являлся катод, бомбардируемый положительными ионами в газовом разряде. Главными недостатками этих трубок были непостоянство характеристик и трудность раздельного регулирования тока и напряжения.

В 1914 г. Кулидж предложил и осуществил высоковакуумную рентгеновскую трубку с источником электронов в виде накаливаемого вольфрамового катода. Температура катода здесь однозначно определяет ток эмиссии, а напряжение, приложенное к вакуумному промежутку, — энергию электронов. На протяжении последнего полувека трубки с горячими катодами являлись основными источниками рентгеновских лучей в самых различных областях физики, медицины и техники. Было создано множество разнообразных модификаций таких трубок от небольших приборов, работающих при напряжениях в несколько десятков киловольт, для поверхностной лучевой терапии и рентгеноструктурного анализа материалов, до крупных секционированных трубок на несколько мегавольт, используемых в лучевой терапии и рентгенодефектоскопии массивных изделий.

Ограничения, связанные с допустимыми температурами и величиной поверхности катода, а также с объемным зарядом электронов, не позволяют получить в рентгеновских трубках с накаливаемыми катодами

большие электронные токи. Как правило, они не превосходят нескольких десятков ампер. Поэтому для физических и технических задач, нуждающихся в особо мощных источниках рентгеновского излучения, в последние два десятилетия развились и получили самостоятельное значение импульсные установки с рентгеновскими трубками, использующими явление автоэлектронной эмиссии. Электронные токи в подобных генераторах лежат в пределах 10^3 — 10^6 а, а пиковая мощность может достигать 10^{12} вт.

Помимо больших установок для получения очень интенсивных вспышек жестких рентгеновских лучей, в последнее десятилетие трубки с автоэлектронными катодами начали применяться в миниатюрных переносных импульсных рентгеновских аппаратах. Отсутствие источников для питания накала трубки и уменьшение размеров элементов при импульсном приложении высокого напряжения позволили создать установки на напряжение 150—300 кэВ весом не более 30 кг, а в некоторых случаях — и в несколько килограммов. Эти приборы получили распространение не только в специальных физических исследованиях, но и в рентгенодефектоскопии и медицинской диагностике.

В настоящей статье рассматривается современное состояние и особенности применения импульсных источников рентгеновских лучей, использующих явление автоэлектронной эмиссии. В обзоре не обсуждаются трехэлектродные импульсные рентгеновские трубки с «заправкой» на катоде. Приборы такого рода, получившие заметное распространение в 40-х и 50-х годах, сейчас вытесняются более простыми двухэлектродными системами. Мы сочли целесообразным включить в статью сведения о способах генерации коротких вспышек рентгеновских лучей при импульсных разрядах в воздухе, а также при разрядах в водороде и других газах при низких давлениях. Хотя приборы, использующие для возбуждения рентгеновских лучей разряды на правой ветви кривой Пашена и вблизи ее минимума, пока не получили заметного практического применения, это направление в развитии способов генерации рентгеновских лучей представляется, несомненно, перспективным.

Последний раздел обзора содержит краткие сведения о радиоактивных источниках характеристического рентгеновского излучения и γ -лучей низкой энергии (4,5—100 кэВ). Несмотря на сравнительно малую интенсивность излучения таких источников, в последнее время они находят все более широкое применение в разнообразных физических исследованиях и технических задачах.

1. ИМПУЛЬСНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ИСТОЧНИКИ С АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИЕЙ

Экспериментальные и теоретические исследования автоэлектронной эмиссии позволили выявить ряд физических особенностей, которые определяют использование этого явления в практических целях. Эмиссия значительных электронных токов в электрических полях $\sim 10^7$ — 10^8 в/см при отсутствии накала катода, большая крутизна вольт-амперной характеристики, возможность получения высокой плотности тока (до 10^8 а/см²) выгодно отличают автоэмиссионные катоды от термоэмиссионных и обеспечивают простоту конструкции и экономичность приборов с автокатадами.

Из формулы Фаулера — Нордгейма следует, что для получения устойчивой автоэлектронной эмиссии необходимо стабилизировать напряженность электрического поля (размеры и форму эмиттера, напряжение на промежутке) и работу выхода автокатада. На практике это связано с рядом технических трудностей, которые были рассмотрены в работах

Дайка и др. ¹, Елинсона ^{2,3}, Мартина и др. ⁴, Острома ⁵. Эмиттеры обычно изготавливаются из тугоплавких металлов или сплавов путем электрохимического травления проволок до радиусов кривизны на конце от десятков ангстрем до нескольких микрон. Отдельные острия свариваются в «гребенки» или «ковры». Для обеспечения одновременной работы многих острий их радиусы кривизны, по предложению Дайка с сотрудниками ^{6,7}, выравниваются прогревом в сверхвысоком вакууме. Выравнивание электрических полей на автоэмиттерах в работах Дайка ⁶, Шарбонье и др. ⁸ производится также «испарением полем» — выдерживанием эмиттера под положительным потенциалом при высокой напряженности поля ($E \approx 10^8$ в/см). Одиночные автоэмиттеры, «гребенки» и «ковры» могут эксплуатироваться в сверхвысоком вакууме после тщательного обезгаживания всего прибора. Несоблюдение этих условий приводит к деформации острий в процессе работы за счет ионной бомбардировки, а также к изменению работы выхода при адсорбции газов и паров на поверхности автоэмиттера. То и другое нарушает стабильность автоэлектронного тока ^{4,5}. При давлении $P \approx 10^{-6}$ тор возможна стабильная работа острейного катода лишь при непрерывном его подогреве до температуры $\sim 1800^\circ$ ⁶.

Крайним случаем нестабильности тока является электрический пробой между катодом и анодом, приводящий обычно к оплавлению острия и выходу его из строя за счет резкого увеличения радиуса кривизны. Исследования механизма пробоя в условиях сверхвысокого вакуума приводятся в статьях Дайка ^{9,10}, Долана ¹¹, Фурсея ¹² и в других работах. При больших плотностях автоэлектронного тока тонкое острие катода разогревается джоулевым теплом, возникает термоавтоэлектронная эмиссия. Это приводит к дальнейшему разогреву острия, росту тока, взрывообразному испарению эмиттера и развитию электрического пробоя в парах металла катодного острия.

При недостаточном обезгаживании автоэмиссионного прибора пробивное напряжение вакуумного промежутка с острым катодом заметно ниже. Картина возникновения пробоя в таких условиях осложняется участием атомов и ионов, выделяющихся из деталей трубки под действием электронной бомбардировки ². Джонс и Морган ¹³ и другие авторы ^{2,14} указывают, что снижение пробивного напряжения может быть связано также с искрением на диэлектрических включениях на поверхности катода в недостаточно чистых условиях эксперимента.

При сопоставлении данных об электрическом пробое в высоком вакууме удалось выявить возможные области существования различных механизмов вакуумного пробоя в зависимости от времени действия напряжения и степени кондиционирования электродов ¹⁵. Сокращение длительности электрического импульса и уменьшение давления остаточных газов (количества адсорбированных веществ на электродах) снижает вероятность вакуумного пробоя и уменьшает число возможных механизмов. В условиях сверхвысокого вакуума причиной пробоя обычно является автоэлектронная эмиссия даже в случае полей, близких к равномерным. Эти же процессы наиболее вероятны для пробоев при коротких импульсах напряжения ($\tau < 10^{-7}$ сек) независимо от степени кондиционирования электродов. Нестабильности, связанные с распылением катода, также менее вероятны при кратковременном приложении напряжения к электродам. По этой причине автоэмиттеры получили особенно широкое распространение в рентгеновских трубках, работающих при импульсных напряжениях малой длительности.

Обширные исследования и разработки в этой области выполнила американская фирма «Филд эмишн корпорейшн» ^{1,4,6-11,16-22}. Эта фирма выпускает серию электровакуумных приборов, в которых источниками

электронов являются острийные вольфрамовые катоды. Техника безмасляной откачки до давления газов $\sim 10^{-12}$ тор, использование материалов высокой чистоты и специальных стекол, применение коротких импульсов напряжения обеспечило достаточную стабильность и удовлетворительный срок службы приборов с автоэмиссионными катодами.

В генераторах рентгеновских вспышек — фекситронах и источниках быстрых электронов — фибетронах используются катоды в виде многоострийных эмиттеров. При работе в режиме больших мощностей ток генерируется за счет автоэлектронной эмиссии, испарения и ионизации паров металла катода^{16,17}. Высоковольтный импульсный пробой прерывается до перехода разряда в дуговую фазу. Длительность импульса высокого напряжения меньше времени пролета иона между катодом и анодом¹⁸. Подобные разрядные явления могут выводить из строя одно или несколько острий за каждый импульс. Однако достаточное количество острий в катоде обеспечивает большое число рабочих включений¹⁶. В зависимости от назначения установки «Филд эмишн корпорейшн» работают в диапазоне напряжений 100—2000 кв. Токи в импульсных рентгеновских трубках и источниках быстрых электронов лежат в пределах 1—10 ка, длительности вспышек — от 3 до 100 нсек, размеры фокусных пятен — 0,5—9,5 мм. Мощность дозы в плоскости окна по данным Дайка и Шарбонье с соавторами^{19,20} может достигать $2 \cdot 10^{11}$ рад/сек при работе с рентгеновской трубкой и $2 \cdot 10^{15}$ рад/сек при выпуске быстрых электронов. Подробные характеристики фекситронов и фибетронов, выпускаемых этой фирмой, приведены в работах¹⁹⁻²³, а также в патентах и рекламных проспектах.

В Советском Союзе теорией автоэлектронной эмиссии и экспериментальной проверкой ряда закономерностей, сопутствующих этому явлению, занимались М. И. Елинсон, Г. Н. Шуппе, И. Л. Сокольская, Г. Н. Фурсей, В. Н. Шредник, Г. А. Месяц и др. Большинство экспериментов проводилось в условиях сверхвысокого вакуума. Однако импульсные рентгеновские трубки с автоэлектронной эмиссией, в отличие от фирмы «Филд эмишн корпорейшн», конструировались для работы при давлениях остаточных газов 10^{-6} — 10^{-7} тор без использования специально изготовленных вольфрамовых острий — автокатодов. При напряжениях 1,5—2 Мв электрические поля в 10^7 — 10^8 в/см, необходимые для значительных автоэлектронных токов, могут быть получены на катоде, представляющем собой трубку с заостренными краями. Микрорельеф подобных сравнительно грубо обработанных катодов обеспечивает высокие автоэлектронные токи в начальной стадии электрического пробоя, которая переходит затем в низковольтный разряд в парах металла и газов. Промежуток времени между началом автоэлектронного тока и возникновением низковольтного разряда определяет здесь продолжительность рентгеновской вспышки. В зависимости от емкости и индуктивности источника питания и амплитуды импульса напряжения она лежит в пределах 150—600 нсек.

Характерными представителями таких приборов являются импульсные рентгеновские трубки с анодом в форме иглы. Их разработка была начата в 1948 г. Цукерманом и Манаковой²⁴ и продолжена в работах Зюзина²⁵, Тарасова и других²⁶. Несмотря на отсутствие принудительной фокусировки электронов, при такой геометрии электродов действующая проекция фокусного пятна в плоскости, перпендикулярной к оси трубки, для пучков небольшой расходимости представляет собой круг, диаметр которого близок к диаметру вольфрамовой иглы (2—4 мм).

Первоначально аппараты для получения рентгеновских вспышек микросекундной и наносекундной длительности предназначались главным

образом для изучения быстротекающих явлений (взрыв, экспериментальная газодинамика, задачи баллистики). При подобных исследованиях для получения четких теневых снимков необходимо, чтобы продолжительность рентгеновской вспышки была меньше промежутка времени, за который изображение исследуемого объекта смещается на десятые доли миллиметра в плоскости снимка. Разработана техника получения двух, четырех и восьми последовательных рентгеновских снимков одного и того же явления с заданными временными интервалами между «кадрами»²⁴. Наряду с этими приложениями автоэлектронные трубки и методы импульсной рентгенографии начали применяться в рентгеноструктурном анализе для изучения быстромменяющихся структурных превращений^{27, 28}.

Позднее было найдено, что импульсные принципы генерации рентгеновских лучей имеют определенное преимущество и в таких традиционных областях использования этого излучения, как дефектоскопия и медицинская рентгенодиагностика. Определяющим фактором в этих применениях является не продолжительность рентгеновской вспышки, а существенное сокращение размеров и веса генератора излучения, связанное с кратковременным действием высокого напряжения. Электрическая прочность диэлектриков, включая вакуум, заметно возрастает, если время воздействия напряжения становится меньше 10^{-6} сек. Разрядные явления в твердых и жидких диэлектриках и в вакууме, формирующиеся обычно за время, превышающее длительность импульса напряжения, исключаются или происходят при более высоких градиентах. В несколько раз сокращаются линейные размеры основных элементов аппарата, включая рентгеновскую трубку. Поэтому в последнее десятилетие импульсные установки начали применяться в качестве малогабаритных переносных источников рентгеновских лучей.

В таблице I представлены характеристики нескольких переносных импульсных аппаратов, разработанных для подобных задач в США,

Таблица I

Характеристики некоторых переносных импульсных рентгеновских аппаратов

Страна	Название аппарата, фирма	Напряжение, кВ	Ток, а	Длительность рентгеновских вспышек, мсек	Диаметр фокусного пятна, мм	Допустимое число включений трубки	Вес, кг	Литература
США	Фекситрон, модель 846-2 фирмы «Field Emission Corp.»	100—150	—	60	1,8	10^4	25	23
СССР	ИРА-2Д, завод «Буревестник»	300	100—200	100—200	2	$2 \cdot 10^4$	25	29, 30, 32
Англия	Генератор рентгеновского излучения фирмы «Hivotronic»	150	1000	50	—	—	11,3	34
СССР	РИНГ	150	700	8	3	$2 \cdot 10^5$	1,4	35

СССР и Англии. Источником высокого напряжения в аппарате фекситрон 846-2 является конденсаторный ударный контур по схеме Маркса. Этот аппарат может работать в частотном режиме 20 импульсов в секунду. Рентгенографирование стали толщиной 8 мм при расстоянии анод—рент-

генопленка 50 см осуществляется за 33 импульса (общая экспозиция — 1,7 сек), максимальная толщина стали, доступная рентгенографированию, — 14 мм²³. Близкими характеристиками обладает разработанный в СССР импульсный рентгеновский аппарат ИРА²⁹⁻³². Его особенностью является применение импульсного трансформатора для получения высокого

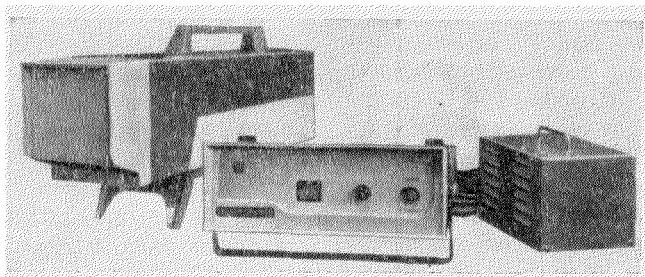


Рис. 1. Импульсный рентгеновский аппарат ИРА-2Д. Изготавливается ленинградским рентгеновским заводом «Буревестник». Вес 25 кг; напряжение на рентгеновской трубке 300 кВ.

напряжения. Двухэлектродная рентгеновская трубка с анодом в форме иглы имеет диэлектрическую шайбу вблизи катода³³. Разрядные явления на поверхности диэлектрика стабилизируют условия возникновения рентгеновской вспышки. Последняя модель аппарата ИРА-2Д показана на рис. 1. Он может работать в частотном режиме 5 импульсов в секунду.

Рентгенографирование стали толщиной 20 мм при расстоянии анод — рентгенопленка 100 см требует 50 вспышек (общая экспозиция 10 сек). В переносном аппарате английской фирмы «Хайвотроник»³⁴ также использован принцип импульсной трансформации высокого напряжения. Прибор рентгенографирует алюминий толщиной 50 мм. Помимо сети переменного тока, в качестве источников питания переносных импульсных рентгеновских аппаратов используются сухие батареи или автомобильные аккумуляторы. Это

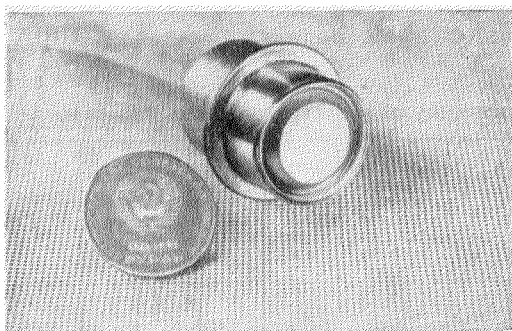


Рис. 2. Миниатюрная импульсная рентгеновская трубка на напряжение 150 кВ.

позволяет применять их для дефектоскопии качества сварных соединений трубопроводов и ферм в полевых условиях при отсутствии сети переменного тока. Кожяк и Пеликс³² отмечают, что аппарат ИРА, первоначально разработанный для изучения быстропротекающих явлений, получил основное применение в качестве переносной установки для рентгенодефектоскопии деталей в труднодоступных местах.

Дальнейшим шагом в задаче сокращения размеров и веса рентгеновских аппаратов явился переход к импульсам напряжения наносекундной длительности. Денхольм³⁵ показал, что при импульсах с кругизной переднего фронта 10^{14} в/сек и более изолятор рентгеновской трубки на напряжение 2,3 Мв может работать при средней напряженности электрического поля около 80 кВ/см. При такой высокой электрической прочности

длина изолятора и общие размеры рентгеновской трубки заметно сокращаются. Та же закономерность наблюдается для более низких напряжений. На рис. 2 представлена разработанная Белкиным, Авиловым, Александровичем и другими^{36, 37} миниатюрная импульсная рентгеновская трубка на напряжение 150 кВ, объем которой не превышает 20 см³. Несмотря на столь малые размеры, трубка выдерживает более 10⁵ рабочих включений и обеспечивает хорошо воспроизводимые рентгеновские вспышки наносекундного диапазона. Производство трубок не требует сверхвысокого вакуума и изготовления специальных острий-автоэммиттеров. Подобные рентгеновские трубки по механизму работы (автоэлектронная эмиссия, начальная стадия вакуумного пробоя) аналогичны фекситронам. Длительность импульса напряжения такого, что разрядные явления прерываются в фазе направленного движения быстрых электронов от катода к аноду. Как и в фекситронах, длительность импульса высокого напряжения недостаточна для развития электрического пробоя (вакуумной дуги).

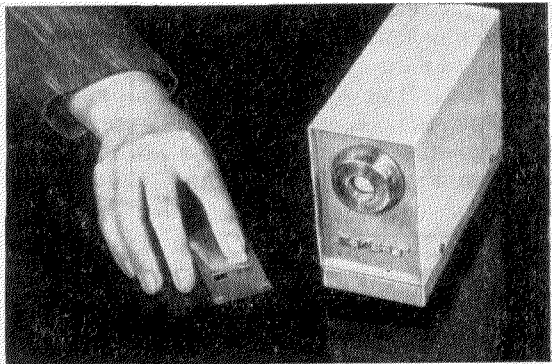


Рис. 3. Переносный рентгеновский импульсный наносекундный генератор РИНГ.
Рабочее напряжение аппарата 150 кВ; вес 1,4 кг.

На рис. 3 показан рентгеновский импульсный наносекундный генератор РИНГ, разработанный Н. В. Белкиным, Э. А. Авиловым и В.И. Колесовым, где использована трубка рис. 2. Его размеры близки к размерам современного транзисторного приемника (140 × 100 × 60 мм³). Можно ожидать, что в ближайшие годы подобные переносные источники излучения весом 1—3 кг, использующие элементы импульсной микрорентгено-техники, получат распространение не только в физических исследованиях, но и во многих технических и медицинских применениях.

2. ГЕНЕРАТОРЫ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОРМОЗНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Преимущества коротких импульсов высокого напряжения широко используются при создании очень мощных генераторов жесткого тормозного излучения. В последние годы подобные установки приобрели существенное значение для изучения свойств материалов в условиях интенсивного облучения, а также для получения мощных импульсов релятивистских электронов.

Увеличение интенсивности рентгеновской вспышки достигается двумя способами: повышением энергии электронов и увеличением тока. В диапазоне энергий $E = 2 - 6 \text{ МэВ}$ доза одиночной рентгеновской вспышки в направлении движения электронов возрастает пропорционально $E^{3,4}$. Высокое значение показателя степени связано с увеличением коэффициента преобразования энергии электронов в рентгеновские кванты, а также с уменьшением расходимости пучка рентгеновских лучей при больших ускоряющих напряжениях. Для увеличения амплитуды электронного тока стремятся к предельному сокращению внутреннего сопротивления источника напряжения. Это достигается применением коаксиальных линий

и уменьшением индуктивности разрядной цепи путем сокращения размеров высоковольтной части установки и ускорительной трубки за счет применения высокопрочных диэлектриков.

В ускорительных трубках мощных генераторов рентгеновских вспышек также используется явление автоэлектронной эмиссии в начальной фазе вакуумного пробоя. Огромные энергии, выделяющиеся на аноде, приводят к значительному его разогреву и повышению давления остаточных газов в ускорительной трубке после каждого разряда³⁸. Поэтому такие приборы, как правило, представляют собой разборные непрерывно откачиваемые системы, работающие при давлении 10^{-6} тор и более. Это исключает использование автоэлектронных острых катодов по типу «Филд эмисшн корпорейшн», работающих только в условиях сверхвысокого вакуума. При ускоряющих напряжениях 3—10 Мв и межэлектродных промежутках в несколько сантиметров электрические поля, необходимые для возникновения мощной автоэлектронной эмиссии, обеспечиваются катодами с радиусами кривизны в десятые доли миллиметра. Возможно применение автокатодов и с большими радиусами кривизны за счет наличия многочисленных микроострий на катодной поверхности.

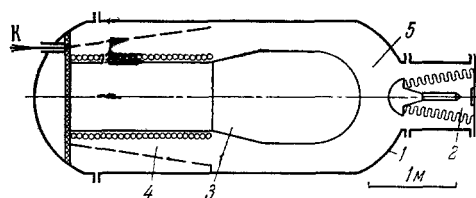


Рис. 4. Схематический разрез импульсного источника жесткого тормозного рентгеновского излучения типа РИУС-5.

К — вывод для включения конденсаторной батареи, обслуживающей первичную обмотку импульсного трансформатора «Тесла».

В мощных генераторах источниками высокого напряжения могут служить конденсаторные ударные контуры по схеме Маркса, импульсные трансформаторы, электростатические генераторы. Небольшой отрезок коаксиальной линии или емкость, заряжаемые такими источниками, разряжаются на ускорительную трубку через разрядник, увеличивающий крутизну переднего фронта импульса высокого напряжения до 10^{14} — 10^{15} в/сек. Примером таких установок может служить резонансный импульсный ускоритель РИУС-5, предложенный и осуществленный в 1969 г. Абрамяном, Вассерманом, Печерским и другими³⁹. В цилиндрическом стальном резервуаре 1 (рис. 4), заполненном сжатым газом, расположены импульсная ускорительная трубка 2 и металлический цилиндр 3. Он заряжается до напряжения 7 Мв по отношению к корпусу генератора при помощи резонансного импульсного трансформатора «Тесла» 4. Такие трансформаторы в последнее время применяются в сильноточных промышленных электронных ускорителях и рентгеновских установках⁴⁰. Амплитуда импульса напряжения и крутизна его переднего фронта задаются разрядным промежутком 5. При пробое этого промежутка емкость, образованная цилиндром и корпусом генератора, разряжается на импульсную трубку.

В таблице II приведены основные характеристики нескольких мощных генераторов импульсов жесткого тормозного рентгеновского излучения, разработанных в 1965—1970 гг. Предложенные Денхольмом³⁵ установки серии FX отличаются от рассмотренного генератора РИУС-5 способом зарядки кондуктора (электростатический генератор). Зеленский, Завада с соавторами⁴¹ осуществили генератор, в котором для уменьшения индуктивности разрядной цепи на импульсную рентгеновскую трубку одновременно разряжаются два синхронно включаемых конденсаторных ударных контура по схеме Маркса. Сравнительно большая продолжительность рентгеновской вспышки (500 нсек) связана с отсутствием в схеме

разрядника-обострителя; крутизна фронта импульса напряжения составляет $\sim 2 \cdot 10^{13}$ в/сек.

Наиболее мощным среди генераторов импульсов жестких рентгеновских лучей в настоящее время, видимо, является «Гермес-2», разработанный Мартином, Джонсоном и Прествичем^{42, 43} в США (фирма «Сандея»). Конденсаторный ударный контур по схеме Маркса, линия Блюмлийна,

Таблица II

Характеристики некоторых мощных генераторов импульсов жесткого тормозного рентгеновского излучения

Страна	Автор и тип установки	Источник высокого напряжения	Запасенная энергия, кВж	Напряжение, Мв *	Ток трубки, ка	Доза импульса на расстоянии 100 см, р	Длительность импульса, нсек	Дата	Литература
США	Денхольм, тип FX-25	Электростатический генератор	1,7	3,5/2,3	19	2	20	1965 г.	40
СССР	Зеленский и др.	Конденсаторный контур Маркса	200	5/4	50	250 **)	500	1967 г.	41
СССР	Абрамян и др., тип РИУС-5	Резонансный трансформатор «Тесла»	5,4	7/4	15	10	40	1969 г.	38
США	Мартин и др., «Гермес-2»	Конденсаторный контур Маркса	1000	24/13	200	6800	70	1969 г.	42, 43
СССР	Печерский и др.	Конденсаторный контур Маркса с H ₂ O-накопителем	30	3/1,5	100	10	60	1970 г.	47

*) Числитель дроби указывает напряжение на кондукторе или напряжение генератора на холостом ходу, знаменатель — напряжение на электродах ускорительной трубки.
 **) В работе⁴¹ указано значение дозы 50 р; впоследствии подбором рациональной геометрии электродов ускорительной трубки доза была увеличена до 250 р за импульс.

удваивающая его напряжение, и импульсная ускорительная трубка помещены в общий бак диаметром 6,8 м и длиной 25 м, заполненный трансформаторным маслом. Для переключения конденсаторов из параллельного соединения в последовательное применяются 93 герметизированных разрядника высокого давления. В подобных условиях мощность дозы на расстоянии 100 см от мишени достигает 10^{11} р/сек.

Размеры генератора импульсов высокого напряжения и его внутреннее сопротивление можно заметно уменьшить, если использовать для изоляции материалы с большим значением диэлектрической постоянной ϵ . Шеррер⁴⁴ для экспериментов со взрывающимися проволочками осуществил конденсаторы с диэлектриком из чистой воды ($\epsilon = 80$), работающие при импульсном напряжении 500 кв. Куликов с соавторами⁴⁵ предложили использовать аналогичную технику для получения больших импульсных токов и сильных электромагнитных полей. Месяц и Воробьев⁴⁶ отметили хорошие коммутационные свойства воды и некоторых других жидких диэлектриков. Используя эти принципы, Печерский с соавторами⁴⁷ предложили и осуществили импульсный генератор коротких рентгеновских вспышек с водяным диэлектриком. Относительное небольшое удельное сопротивление воды ($10^6 - 10^7$ ом·см) при зарядке емкости

коротким электрическим импульсом не является ограничивающим фактором. В подобных условиях электрическая прочность воды приближается к прочности таких совершенных диэлектриков, как трансформаторное масло $((2-5) \cdot 10^5 \text{ в/см})$. В емкости с водяным диэлектриком небольших размеров (диаметр корпуса 100 см, длина 50 см) оказалось возможным сконцентрировать энергию 30 кдж при напряжении 3 Мв и быстро реализовать ее в импульсной ускорительной трубке. При сокращении времени зарядки водяного конденсатора до 10^{-7} сек удельная концентрация энергии может достигать 1 кдж/см^3 .

В 1967 г. Рекс Пей⁴⁸ сообщил, что фирма «Физикс интернейшнл» приступила к проектированию импульсного генератора жесткого тормозного излучения, обеспечивающего на расстоянии 1 м от мишени дозу в 50 000 р за импульс продолжительностью 100 нсек. Для получения такой высокой интенсивности излучения, почти на порядок превосходящей интенсивность генератора «Гермес-2», авторы рассчитывают увеличить амплитуду электронного тока в трубке до 3 Ма при энергии электронов 10 Мэв. Мы не располагаем сведениями об окончании строительства этой уникальной установки и о том, какие действительные характеристики были получены при ее испытании. Несомненно, однако, что в настоящее время осуществление проектов подобных сверхмощных источников импульсов жестких рентгеновских лучей не сопряжено с какими-либо затруднениями принципиального физического характера. Применение высокопрочных диэлектриков с большими значениями ϵ и современной техники генерации импульсов высокого напряжения делают вполне реальным создание гигантских генераторов, работающих при импульсных токах в миллионы ампер и ускоряющих напряжениях в десятки мегавольт.

Следует отметить, что большинство рассмотренных в настоящем разделе генераторов импульсов жесткого тормозного рентгеновского излучения одновременно используются и для получения и исследования мощных импульсов быстрых электронов. Для подобных целей мишень (анод) в ускорительной трубке заменяют выходным окном из бериллиевой или титановой фольги. Таким путем оказалось возможным вывести в атмосферу или в камеру с разреженным газом электронные пучки при токах в десятки и сотни килоампер. Грейбил⁴⁹ исследовал фокусировку подобных электронных пучков собственным магнитным полем, а также условия ионной фокусировки в камерах при давлении газа $10^{-1} - 10^{-3}$ тор. Такие очень мощные импульсы быстрых электронов представляют самостоятельный интерес для проблемы управляемого термоядерного синтеза⁵⁰, накачки оптических квантовых генераторов, радиационной химии и радиобиологии⁴⁸.

3. ГЕНЕРИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДАХ В ВОЗДУХЕ И ДРУГИХ ГАЗАХ

До последнего времени необходимым условием получения рентгеновских лучей считалось наличие вакуума или газа низкого давления в объеме прибора. Все рентгеновские трубки работали на левой ветви кривой Пашена. Однако принципиально возможно возбуждение рентгеновского излучения и на правой ветви кривой Пашена, при давлениях газа, близких к атмосферному. Если импульс высокого напряжения обладает достаточно крутым фронтом, разрядные явления в газе развиваются при более высоких напряжениях. Напряженность поля у катода становится достаточной для автоэлектронной эмиссии. Ионизация газа и эмиссия электронов с катода в результате его бомбардировки положительными ионами приводят к быстрому возрастанию числа свободных электронов

в промежутке. В определенных условиях потери энергии электронов при соударениях оказываются меньше, чем энергия, приобретаемая ими за счет ускорения в электрическом поле. В результате торможения быстрых электронов в газе и материале анода должно возникать рентгеновское излучение.

Мягкие рентгеновские лучи были впервые зарегистрированы при электрическом разряде в гелии Френкелем и др.⁵¹ и в воздухе Станкевичем и Калининим⁵². Интенсивность рентгеновских вспышек в этих экспериментах была невелика. В работе⁵² она составляла $6 \cdot 10^4$ квантов в полном телесном угле, для получения заметного почернения рентгенопленки необходимо около ста таких вспышек. В работе Ноггла с соавторами⁵³ при разрядах в гелии ($p \approx 760 \text{ тор}$) наблюдались рентгеновские лучи с энергией квантов 11—13 *кэв*. Интенсивность излучения составляла $(2-4) \cdot 10^7$ фотонов на разряд.

В работах Тарасовой и Худяковой^{54, 55, 36} показано, что за счет увеличения крутизны импульса напряжения и уменьшения внутреннего сопротивления источника, а также подбором конструкции электродов открытого воздушного разрядника можно значительно повысить интенсивность излучения. Амплитуда импульса высокого напряжения составляла 120—130 *кв*, крутизна его переднего фронта — около 10^{14} *в/сек*.

Характеристики рентгеновского излучения зависят от режима разряда. При напряжениях, меньших пробивного, рентгеновские лучи возникают в основном в слое газа в катодной части промежутка. В таком режиме наблюдается диффузное свечение вблизи катода. При разрядах с явно выраженными светящимися каналами (пробой) часть быстрых электронов может бомбардировать анод. В этом случае испускание рентгеновских лучей происходит одновременно из анода и газового слоя. Продолжительность рентгеновской вспышки не превосходит нескольких наносекунд.

Высокотемпературная плазма в водороде, гелии, ксеноне и других газах при сильнотоочных электрических разрядах может также являться источником коротких вспышек рентгеновских лучей. В таких экспериментах обычно используются конденсаторные батареи при скорости нарастания тока $dI/dt \approx 10^{10} - 10^{12}$ *а/сек*, амплитуда импульса тока лежит в пределах $10^5 - 10^6$ *а*. Первые исследования подобного излучения, выполненные Лукьяновым и Подгорным⁵⁶ и Арцимовичем с соавторами⁵⁷, проводились в цилиндрических камерах со стенками из изолятора, когда под действием магнитного поля тока разряд стягивался в узкий шнур, расположенный вдоль оси камеры (прямой цилиндрический пинч). Позднее Т. И. и Н. В. Филипповы и Виноградов⁵⁸, Мейзер, Боттомс⁵⁹ и другие обнаружили, что интенсивность излучения заметно возрастает при разрядах в камерах с металлическими стенками (нецилиндрический z-пинч).

В подобных условиях существуют два источника рентгеновских вспышек с различными спектральными характеристиками, разделенные в объеме камеры. Мягкие рентгеновские лучи с энергиями 1—10 *кэв* возникают в фокусе схождения плазменной оболочки. По данным Бекнера⁶⁰ такой плазменный фокус обеспечивает дозу около 60 *p* на расстоянии 10 *см* за импульс продолжительностью 200—300 *нсек*. Мягкие рентгеновские лучи плазменного фокуса представляют собой тормозное, рекомбинационное и линейчатое излучение плотной высокотемпературной плазмы.

Источником более жесткого рентгеновского излучения является анод камеры и слой металлических паров вблизи этого электрода, возникающий в результате контакта пинча с анодом. По данным Агафонова с соавторами⁶¹ в момент кумуляции нецилиндрического z-пинча инду-

цируются поля, ускоряющие электроны до энергии 100—300 кэв. Электронный ток, вовлеченный в процесс такого ускорения, составляет 10—100% полного разрядного тока. Доза жесткого рентгеновского излучения лежит в пределах 0,1—1 р на расстоянии 100 см от мишени за импульс продолжительностью 100 нсек. Пока еще не существует завершенной теории происхождения жесткого рентгеновского излучения, количественно согласующейся с экспериментальными данными. Предполагается, что локальные радиальные деформации пинча могут вызвать быстрое нарастание магнитного поля и создать условия для линейного или циклического ускорения электронов в индукционных электрических полях.

4. РАДИОАКТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ РЕНТГЕНОВСКИХ И ГАММА-ЛУЧЕЙ НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ

Прогресс техники и технологии производства искусственных радиоактивных элементов сделал практически доступными изотопы, рентгеновское и γ -излучение которых близко соответствует спектральным характеристикам рентгеновских трубок. Преимуществами радиоактивных источников являются высокое постоянство интенсивности и энергии, возможность получения излучения без применения электрического питания, высокая надежность. Наряду с широко известными источниками жестких γ -лучей на основе радиоизотопов Co^{60} и Cs^{137} в последнее десятилетие развились и получили самостоятельное значение многочисленные методики и приборы, где в качестве источников рентгеновской радиации с энергией до 100 кэв применяются различные радиоактивные изотопы.

В таблице III приведены данные о нескольких радиоактивных изотопах, испускающих характеристическое рентгеновское излучение и γ -лучи

Таблица III

Некоторые радиоактивные изотопы, испускающие характеристическое рентгеновское излучение и гамма-лучи низкой энергии

Элемент	Изотоп	Тип распада	Период полураспада, годы	Энергия квантов, кэв		Интенсивность излучения	
				рентгеновское излучение	γ -лучи	квантов/г·сек	квантов/см ² сек
Ванадий	$^{23}\text{V}^{49}$	ϵ -захват	0,915	K-серия Ti 4,5; 4,9	—	$5,9 \cdot 10^{13}$	$1,6 \cdot 10^{11}$
Железо	$^{26}\text{Fe}^{55}$	ϵ -захват	2,6	K-серия Mn 5,9; 6,5	—	$2,5 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{11}$
Плутоний	$^{94}\text{Pu}^{238}$	α -распад	84,6	L-серия U 13,6; 17,2; 20,2	—	$8,6 \cdot 10^{10}$	$3,8 \cdot 10^8$
Америций	$^{95}\text{Am}^{241}$	α -распад	458,1	—	43,5	$2,5 \cdot 10^8$	$4,7 \cdot 10^6$
				—	99,8	$5,3 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^7$
				L-серия Np 13,9; 17,7; 20,8	—	$2,8 \cdot 10^{10}$	$1,9 \cdot 10^8$
				—	26,4	$3 \cdot 10^9$	$1,3 \cdot 10^7$
				—	33,2	$1,3 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^6$
				—	43,4	$8,4 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^6$
—	59,6	$4,3 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^9$				
—	99	$2,8 \cdot 10^7$	$5,5 \cdot 10^6$				
—	102,8	$2,3 \cdot 10^7$	$5,2 \cdot 10^6$				

низкой энергии (до 100 кэв). Изотопы V^{49} и Fe^{55} распадаются по схеме ϵ -захвата. Они являются удобными источниками мягкого практически

«чистого» характеристического рентгеновского излучения титана и марганца. Трансурановые изотопы Pu^{238} и Am^{241} претерпевают α -распад. Ранее они использовались главным образом как α -источники. В последние годы эти изотопы стали применяться как источники рентгеновских и γ -лучей низкой энергии.

В двух последних столбцах табл. III представлены данные о количестве рентгеновских и γ -квантов, испускаемых в секунду на один грамм чистого изотопа, а также с одного квадратного сантиметра поверхности в телесный угол 2л. Для практических целей особенно существен выход излучения с единицы поверхности (последний столбец). Этот выход рассчитывался для слоя изотопа с толщиной, соответствующей пробегу излучения указанной энергии. Благодаря относительно небольшой энергии квантов собственное поглощение излучения в веществе источника значительно, и пробег характеристического рентгеновского излучения или γ -лучей низкой энергии сравнительно мал. Он составляет 15 $\mu\text{м}$ для характеристических рентгеновских лучей изотопа Fe^{55} и около 80 $\mu\text{м}$ — для γ -лучей с энергией 59,6 кэв изотопа Am^{241} .

Излучение радиоактивных источников заметно уступает по интенсивности излучению обычных рентгеновских установок. Выход характеристических рентгеновских лучей марганца с поверхности источника из изотопа Fe^{55} (10^{11} квантов/ $\text{см}^2\text{сек}$) прибли-

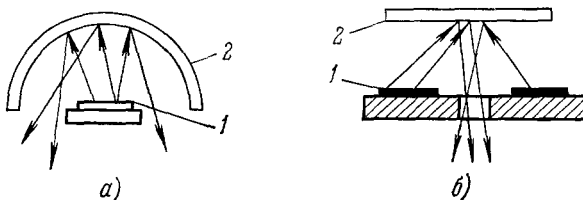


Рис. 5. Схемы расположения радиоактивного источника (1) и флуоресцентной мишени (2) для возбуждения вторичного характеристического рентгеновского излучения.

а) Полусферическая мишень; б) источник ограниченных размеров.

женно равен выходу рентгеновской трубки с марганцевым анодом, работающей при напряжении 15 кв и токе 50 ма . Подобные трубки обычно эксплуатируются при токах 5—15 ма . Интенсивность излучения трубки в данном случае более чем на два порядка превосходит интенсивность рентгеновских лучей, испускаемых изотопом Fe^{55} . Для изотопов Pu^{238} и Am^{241} это различие в интенсивностях более значительно. Тем не менее возможность существенного сокращения расстояния между радиоактивным источником и объектом облучения, применение светосильных методов и других приемов позволяют радиоактивным изотопам во многих случаях успешно конкурировать с традиционной техникой получения рентгеновских лучей.

Изоотопы табл. III представляют довольно большой диапазон энергий квантов — от 4,5 до 60 кэв . Флуоресцентные мишени, облучаемые этими изотопами, могут являться источниками излучений промежуточных энергий. Возбуждение флуоресцентного излучения особенно эффективно, если порядковый номер Z элемента мишени на 1—6 номеров ниже Z элемента, испускающего характеристические рентгеновские лучи. При таком согласовании энергий первичного и вторичного излучения интенсивность флуоресцентных лучей может достигать десятков процентов интенсивности первичного пучка ⁶².

На рис. 5 приведены две схемы расположения радиоактивного источника и флуоресцентной мишени. Когда размеры излучателя незначительны, используют схему рис. 5, а. Радиоактивный источник 1 имеет форму небольшого диска, расположенного вблизи центра полусферической флуоресцентной мишени 2. Этот способ отличается высокой эффективностью, так как первичное излучение источника используется в телесном угле

около 2л. Схема рис. 5, б обладает меньшей эффективностью, но позволяет получать источники флуоресцентного излучения небольших размеров. Радиоактивный источник представляет собой кольцо, против активного слоя которого размещена флуоресцентная мишень. Отверстие в кольце определяет действующий размер источника излучения.

Опишем несколько методов и приборов, при практической реализации которых преимущества радиоактивных источников рентгеновских лучей оказались особенно существенными. В последние годы, в связи с разработкой реакторной технологии производства изотопа железа Fe^{55} ⁶³, оказалось возможным получать источники из этого изотопа сравнительно небольшой стоимости. Появился ряд приборов, в которых источником мягких характеристических рентгеновских лучей являлось радиоактивное железо.

Радиоактивный контактный рентгеновский микроскоп с изотопом Fe^{55} позволяет исследовать небольшие энтомологические и ботанические объекты, тонкие гистологические срезы и определять химическую принадлежность выявленных структур. 1 и 2 — радиоактивный источник и флуоресцентная мишень, излучение которой освещает исследуемый образец 3, находящийся в плотном контакте с мелкозернистой фотопластинкой 4 (рис. 6). Если отверстие в источнике невелико (0,3—0,5 см), а контролируемый объект имеет толщину не более 0,1 мм, то при расстояниях от источника до фотопластинки 5—10 см размытие изображения за счет геометрических факторов не превышает нескольких микрон. После проявления полученная таким путем контактная рентгенограмма может быть увеличена в 10—60 раз.

На рис. 7 и 8 приведены отпечатки контактных микрорентгенограмм гистологических срезов сердечного клапана и легкого людей, погибших от инфаркта и силикоза⁶⁴. Срез сердечного клапана рентгенографировался прямым излучением источника с изотопом Fe^{55} ($\lambda K_{\alpha} = 2,103 \text{ \AA}$). Для выявления распределения соединений кремния в срезе легочной ткани (рис. 8) применялось излучение флуоресцентной мишени из серы ($\lambda K_{\alpha} = 5,36 \text{ \AA}$). Излучение серы избирательно поглощается кремнием, и темные полосы, окружающие бронх, отчетливо выявляют области, занятые соединениями этого элемента. Контрольная рентгенограмма того же среза выполнялась в характеристическом излучении кремния ($\lambda K_{\alpha} = 7,11 \text{ \AA}$). Массовый коэффициент поглощения этого излучения в кремнии в несколько раз меньше, чем коэффициент поглощения излучения серы. Сравнение микрорентгенограмм, полученных на излучении, избирательно поглощаемом в данном элементе, и на излучении мишени из этого элемента, которое слабо поглощается в нем, позволяет установить химическую принадлежность структур, фиксируемых при помощи рентгеновского микроскопа.

Интересным и перспективным является использование характеристических рентгеновских лучей, испускаемых изотопом Fe^{55} , при рентгеноструктурных исследованиях поликристаллических образцов и монокристаллов. Первые предложения и эксперименты в этой области были опубликованы у нас в 1965 г.⁶⁵ В США аналогичные исследования опубликованы Прюссом с сотрудниками⁶⁶ в 1966 г. Малая интенсивность

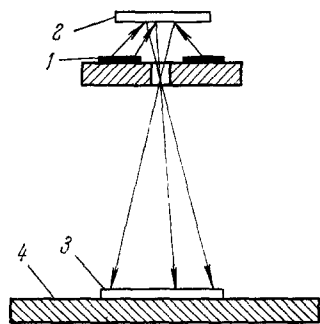


Рис. 6. Схема радиоактивного контактного рентгеновского микроскопа.

1 — радиоактивный источник, 2 — флуоресцентная мишень; 3 — исследуемый объект, 4 — мелкозернистая фотопластинка.

излучения радиоизотопов по сравнению с рентгеноструктурной трубкой приводила в первых опытах по фотографической регистрации интерференций к очень продолжительным экспозициям (более 100 часов). Применение аксиального фокусирования широко расходящегося первичного пучка рентгеновских лучей по Престону — Альтшулеру⁶⁷ позволило в известной степени устранить этот недостаток. В камере «Рада», использующей такую фокусировку, полоска радиоактивной железной фольги размерами $1 \times 3 \text{ мм}^2$ установлена на месте входной щели^{68, 69}. При общей активности источника около 60 мкюри (обогащение 6—8% по изотопу Fe^{55}) рентгенограммы поликристаллических образцов простой кубической сингонии (медь, никель) получаются за время 1—3 часа⁷⁰. Тузекер, Бугенис и другие опубликовали несколько работ, в которых источник с изотопом Fe^{55} использовался в камерах Дебая^{71—73}.

По сравнению с общепринятой методикой рентгеноструктурных исследований преимуществами камер с радиоактивными источниками характеристических рентгеновских лучей являются полная автономность приборов (отсутствие источника электроэнергии), малые размеры и вес, высокое постоянство интенсивности излучения. Подобная техника представляет определенный интерес для рентгеноструктурного анализа геологических проб при поиске минерального сырья в экспедиционных условиях. Источники с изотопом Fe^{55} могут найти применение в специальной аппаратуре для изучения структуры материалов при высоких и низких температурах, при измерениях внутренних напряжений в деталях машин и металлических конструкциях и в других подобных задачах.

Мягкие рентгеновские лучи радиоактивных источников использовались Куком, Меллишом и Пэйном для измерения толщин тонких покрытий⁷⁴. Методика определения толщины металлических фольг и органических пленок по поглощению характеристического или тормозного рентгеновского излучения, возбуждаемого β -частицами трития ($E_{\text{max}} = 18 \text{ кэВ}$), описана в работе⁷⁵. Измерение толщины покрытий при помощи источни-

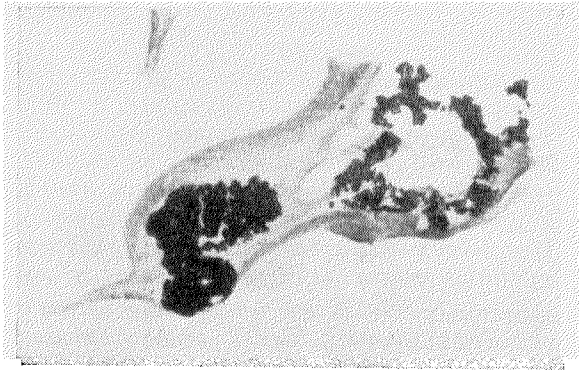


Рис. 7. Микрорентгенограмма гистологического среза сердечного клапана человека, погибшего от инфаркта.

Темные включения — области скопления солей кальция и калия. Оптическое увеличение $\times 10$.

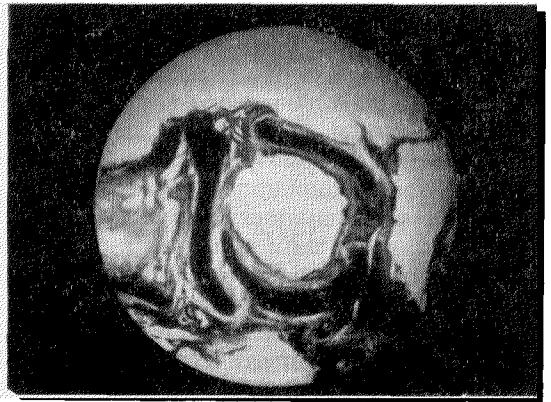


Рис. 8. Микрорентгенограмма гистологического среза легкого человека, погибшего от силикоза.

Темные включения, окружающие бронх, — скопления соединений кремния. Оптическое увеличение $\times 10$.

ков с изотопом Fe^{55} основано на возбуждении флуоресцентного излучения материала подложки или покрытия. Толщина покрытия определяется по поглощению излучения подложки в покрытии или по измерению интенсивности излучения покрытия. Для некоторых пар подложка — покрытие (например, золотое покрытие на олове) была достигнута чувствительность $6 \cdot 10^{-8}$ г/см² ⁷⁶.

Число возможных комбинаций подложка — покрытие можно заметно расширить, применив дифракционную методику. Она заключается в пространственном разделении и регистрации дифракционных отражений под различными брэгговскими углами от покрытия и подложки. В определенных пределах возрастание интенсивности интерференционной линии покрытия пропорционально увеличению его толщины. Уменьшение интенсивности интерференционной линии подложки за счет ее ослабления в материале покрытия также однозначно связано с толщиной последнего. Используя характеристическое излучение изотопа Fe^{55} и интерференционную линию (113) Au, оказалось возможным измерить золотой слой толщиной 1000 Å на медной подложке с ошибкой не более 10%.

Радиоизотопы, испускающие мягкое рентгеновское излучение и γ -лучи низкой энергии, оказались удобными источниками в рентгеноспектральных исследованиях. Изотоп Fe^{55} применяется для возбуждения флуоресцентного излучения легких элементов от алюминия до хрома ($Z = 13-24$) при количественном анализе с помощью бескристалльных спектрографов ⁷⁷. В таких приборах характеристическое излучение элементов контролируемой пробы отдельно регистрируется в зависимости от энергии рентгеновских квантов. Для анализа элементов средней части таблицы Менделеева ($Z = 24 - 69$) используют рентгеновские и γ -лучи изотопов Pu^{238} и Am^{241} ⁷⁸. Эти компактные источники излучения позволяют осуществить небольшие переносные аппараты для анализа проб в условиях геологического поиска, при определении концентрации минерального сырья в штольнях и в других подобных задачах.

Свойства рассмотренных радиоизотопов могут оказаться полезными в некоторых радиобиологических и медицинских применениях. Несмотря на малую интенсивность излучения по сравнению с рентгеновскими аппаратами, при плотном контакте с облучаемой поверхностью эти источники в состоянии обеспечить достаточную дозу излучения для наблюдения радиобиологических эффектов. Аппликаторы из изотопа Fe^{55} с обогащением 6—8% в подобных условиях обеспечивают дозу 6000—8000 р/час. Необходимый терапевтический эффект может быть получен при наложении такого аппликатора на облучаемый участок в течение нескольких минут. По своим характеристикам излучение изотопа Fe^{55} примерно соответствует тормозному излучению рентгеновской трубки, работающей при напряжении 12—15 кэ, а излучение Am^{241} — терапевтической рентгеновской установке на напряжение 120—150 кэ. Преимуществом радиоизотопов является возможность лучевой терапии внутренних полостей, куда трудно, а иногда и невозможно, ввести терапевтическую рентгеновскую трубку. В радиобиологических экспериментах мягкие рентгеновские лучи изотопа Fe^{55} позволяют локализовать облучаемый слой из-за небольшой величины пробега этого излучения в биологическом объекте (0,5—1 мм).

Важным практическим преимуществом радиоактивных источников рентгеновских и γ -лучей низкой энергии является простота защиты обслуживающего персонала от излучения. При использовании материалов, избирательно ослабляющих излучение изотопа, вес и размеры контейнеров и защитных устройств намного уменьшаются. Источники из изотопа Fe^{55} активностью в несколько десятков кюри можно безопасно хранить и транспортировать в контейнерах весом около 0,4 кг. Сравнительно

небольшие размеры и вес имеют также контейнеры для источников из изотопов Pu^{238} и Am^{241} . Это позволяет применять рассмотренные выше источники и приборы в обычных помещениях без громоздких защитных устройств, используемых в работах с источниками жестких γ -лучей на основе изотопов Co^{60} или Cs^{137} .

Импульсная техника, автоэлектронная эмиссия, разряды в газах и радиоизотопы, разумеется, не исчерпывают физические явления и принципы, которые используются при создании новых источников рентгеновских лучей. Интересным и обещающим является сообщение об импульсных безжелезных бетатронах с циркулирующими токами ~ 90 а при энергии электронов до 100 Мэв⁷⁹. Продолжительность вспышки тормозного излучения в таких установках может изменяться от нескольких десятков наносекунд до десятков микросекунд. Существуют и другие направления. Тем не менее для задач, решение которых требует использования миниатюрных переносных рентгеновских аппаратов, импульсная техника и трубки с автоэлектронными катодами обладают преимуществами перед другими способами генерации излучения. Когда наряду с минимальными размерами к источникам предъявляются требования высокой стабильности излучения и малого расхода электрической энергии, перспективно применение радиоизотопов. Следует также ожидать новых успехов в использовании импульсных принципов генерации очень мощных вспышек жесткого тормозного рентгеновского излучения и релятивистских электронов в установках прямого ускорения при мегавольтных напряжениях и мегаамперных электронных токах.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. W. P. Duke, W. W. Dolan, *Advances in Electronics and Electron Phys.* (Acad. Press, New York) 8, 153 (1956).
2. М. И. Елинсон, Г. Ф. Васильев, *Автоэлектронная эмиссия*, М., Физматгиз, 1958.
3. М. И. Елинсон, *Радиотехника и электроника* 2 (2), 204 (1957).
4. E. E. Martin, J. K. Trolan, W. P. Duke, *J. Appl. Phys.* 31, 5, 782 (1960).
5. A. van Oostrom, *J. Appl. Phys.* 33 (10), 2917, (1962).
6. W. P. Duke, F. M. Charbonnier, R. W. Strayer, R. L. Floyd, J. P. Varbour, J. K. Trolan, *J. Appl. Phys.* 31 (5), 790 (1960).
7. W. P. Duke, *JRE Trans. of Military Electronics, MIL-4* (1), 38 (1960).
8. F. M. Charbonnier, J. P. Varbour, L. E. Garrett, W. P. Duke, *Proc. IEEE* 51, (7), 991 (1963).
9. W. P. Duke, J. K. Trolan, E. E. Martin, J. P. Varbour, *Phys. Rev.* 91 (5), 1043 (1953).
10. W. P. Duke, J. K. Trolan, *Phys. Rev.* 89 (4), 799 (1953).
11. W. W. Dolan, W. P. Duke, J. K. Trolan, *Phys. Rev.* 91 (5), 1054 (1953).
12. Г. Н. Фурсей, П. Н. Воронцов-Вельяминов, *ЖТФ* 37 (10), 1880 (1967).
13. F. L. Jones, C. G. Morgan, *Proc. Roy. Soc.* A218, 1132, 88 (1953).
14. W. P. Duke, F. M. Charbonnier, *Advances Electron. Tube Techn.*, Oxford-London, New York-Paris, Pergamon Press, 1963, стр. 199.
15. Л. В. Тарасова, *ДАН СССР* 167 (2), 330 (1966).
16. W. P. Duke, F. J. Grundhauser, Патент США, кл. 250—49. 5 № 33173006, заявл. 22. 10. 1962, опубл. 9.03.1965.
17. W. P. Duke, F. J. Grundhauser, *Mc. Minnville, Пат. США*, кл. 313—57, № 3259773, 1961.
18. Рефераты патентных заявок. Великобритания, 980001—1000000, *Abridgments of specifications*, II, XXIII, 987.478 X-ray tubes F. E. Corporation, Sept. 24.1962, No. 36271/62.
19. W. P. Duke, J. P. Varbour, F. J. Grundhauser, F. M. Charbonnier, *Radioisotopes for Aerospace*, part 1, Plenum press, 1966, стр. 220.
20. F. M. Charbonnier, J. P. Varbour, J. G. Bremster, W. P. Duke, F. J. Grundhauser, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 14 (3), 789 (1967).

21. W. P. Duke et al., *Encyclopedia of X-rays and Gamma-Rays*, New York, 1963, стр. 142.
22. W. P. Duke, *Encyclopedia of X-rays and Gamma-rays*, New-York, 1963, стр. 1097.
23. G. Brüdigan, *Technik* 23 (6), 405 (1968).
24. В. А. Цукерман, М. А. Манакова, *ЖТФ* 27 (2), 391 (1957).
25. В. П. Зюзин, М. А. Манакова, В. А. Цукерман, *ПТЭ*, № 1, 84 (1958).
26. Д. М. Тарасов, А. А. Лукашев, Н. А. Селезнев, Л. Ф. Склизкова, *ПТЭ* № 2, 118 (1960).
27. Н. И. Завада, М. А. Манакова, В. А. Цукерман, *ПТЭ*, № 2, 164 (1966).
28. Л. А. Егоров, А. А. Лукашев, Э. В. Ниточкина, Ю. К. Орехин, *ПТЭ*, № 2, 200 (1968).
29. К. Ф. Зеленский, И. А. Трошкин, В. А. Цукерман, *ПТЭ*, № 2, 140 (1963).
30. К. Ф. Зеленский, И. А. Трошкин, В. А. Цукерман, Н. И. Комяк, Е. А. Пеликс, *Авт. свид. на изобретение* № 240868 с приоритетом от 14 мая 1964 г.
31. В. А. Цукерман, К. Ф. Зеленский, *Авт. свид. на изобретение* № 126962 с приоритетом от 8 мая 1959 г.
32. Н. И. Комяк, Е. А. Пеликс, *Дефектоскопия*, № 5, 91 (1967).
33. К. Ф. Зеленский, И. А. Трошкин, В. А. Цукерман, Г. Н. Слосова, Н. А. Дронь, А. В. Аносов, *Авт. свид. на изобретение* № 219704 с приоритетом от 3 октября 1963 г.
34. *Electronics*, 42 (2), 51 (1969).
35. A. S. Denholm, *IEEE Trans, Nucl. Sci. NS-12* (3), 780 (1965); см. также: *Nucleonics* 25 (1), 20 (1967).
36. Э.-Г. В. Александрович, Н. В. Белкин, К. Ф. Зеленский, Н. Г. Павловская, Л. В. Тарасова, Л. Н. Худякова, В. А. Цукерман, *Доклад на сессии научного совета по физической электронике, АН СССР, Москва, ноябрь 1968 г.* (см. *Радиотехника и электроника* 14, вып. 8, 1535 (1969)).
37. Н. В. Белкин, Э. А. Авилов, *ЖТФ* 40 (8), 1729 (1970).
38. К. Ф. Зеленский, О. П. Печерский, В. А. Цукерман, *ЖТФ* 38 (9), 1581 (1968).
39. Е. А. Абрамян, С. Б. Вассерман, В. Н. Долгушин, Л. А. Моркин, О. П. Печерский, В. А. Цукерман, *ДАН СССР* 192 (1), 76 (1970).
40. E. A. Abramyan, *Nucl. Instr. and Methods* 59 (1), 22 (1968).
41. К. Ф. Зеленский, Н. И. Завада, И. А. Трошкин, В. А. Цукерман, *ПТЭ*, № 4, 177 (1969).
42. T. H. Martin, *Bull. Amer. Phys. Soc.*, ser. II, 14 (2), 204 (1969).
43. D. L. Johnson, T. H. Martin, K. R. Prestwich, *Bull. Amer. Phys. Soc.*, ser. II, 14 (2), 204 (1969).
44. В. Шеррер, в сборнике «Взрывающиеся проволочки», под ред. А. А. Рухадзе, М., ИЛ, 1963, стр. 109.
45. Б. И. Куликов, В. М. Лагунов, Ю. Е. Нестерихин, В. М. Федоров, *Авт. свид.* В2505 (1967).
46. Г. А. Месяц, Г. А. Воробьев, *Изв. вузов (Физика)*, № 3, 21 (1962).
47. О. П. Печерский, А. М. Сидорук, В. Д. Тарасов, В. А. Цукерман, *ДАН СССР* 192 (6), 1266 (1970).
48. Rex Ray, *Technology Week* 20 (1), 10 (1967).
49. S. E. Graubill, S. V. Nablo, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-14 (3) 782 (1967).
50. F. Winterberg, *Phys. Rev.* 174 (1), 213 (1968).
51. S. Frankel, V. Highland, T. Sloan, O. van Dyck, W. Wales, *Nucl. Instr. Meth.* 44 (2), 345 (1966).
52. Ю. Л. Станкевич, В. Г. Калинин, *ДАН СССР* 177 (1), 72 (1967).
53. R. C. Noggle, E. P. Krider, J. R. Wayland, *J. Appl. Phys.* 39 (10), 4746 (1968).
54. Л. В. Тарасова, Л. Н. Худякова, *Доклад на III Международном симпозиуме по разрядам и электрической изоляции в вакууме, Париж, сентябрь 1968* (см. *Pros. of the III Intern. Sympos. on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum, Paris, 1968*, p. 62-63).
55. Л. В. Тарасова, Л. Н. Худякова, *ЖТФ* 39 (8), 1530 (1969).
56. С. Ю. Лукьянов, И. М. Подгорный, *Атомная энергия* 1 (3), 88 (1956).
57. Л. А. Арцимович, А. М. Андрианов, Е. И. Добрыхотов, С. Ю. Лукьянов, И. М. Подгорный, В. И. Синицин, Н. В. Филиппов, *Атомная энергия* 1 (3), 84 (1956).
58. Н. В. Филиппов, Т. И. Филиппова, В. П. Виноградов, *Nuclear Fusion, Supplement*, p. 2, 577 (1962).

59. J. W. Mether, P. J. Bottoms, *Phys. Fluids* **11** (3), 611 (1968).
60. E. H. Veskneg, *Rev. Sci. Instr.* **38** (4), 507 (1967).
61. В. И. Агафонов, Г. В. Голуб, Л. Г. Голубчиков, В. Ф. Дьяченко, В. Д. Иванов, В. С. Имшенник, Ю. А. Колесников, Э. Б. Свирский, Н. В. Филиппов, Т. И. Филиппова, *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, v. 2, IAEA Conf. Proceedings, Novosibirsk, 1969, стр. 21.
62. М. А. Блохин, *Физика рентгеновских лучей*, М., Гостехиздат, 1957.
63. Л. Д. Данилин, С. И. Лобов, А. И. Павлова-Веревкина, В. А. Цукерман, *Атомная энергия* **21** (2), 112 (1966).
64. С. И. Лобов, Н. Г. Павловская, В. П. Понеделко, В. А. Цукерман, *Архив патологии* **31** (9), 72 (1969).
65. С. И. Лобов, В. А. Цукерман, *ДАН СССР* **165** (6), 1278 (1965).
66. L. E. Preuss, W. S. Toothacker, C. K. Bugenis, *Appl. Phys. Lett.* **9** (4), 159 (1966).
67. Л. В. Альтшулер, *ЖЭТФ* **13**, 11 (1943).
68. С. И. Лобов, В. Н. Фунин, В. А. Цукерман, Доклад на VII Международном конгрессе по кристаллографии, Москва, июль 1966 г.
69. С. И. Лобов, В. Н. Фунин, В. А. Цукерман, *ПТЭ*, № 6, 172 (1966).
70. S. I. Lobov, V. N. Funin, V. A. Zukerman, *Nature* **222** (No. 5195), 767 (1969).
71. L. E. Preuss, W. S. Toothacker, C. K. Bugenis, *J. Appl. Phys.* **38** (8), 3404 (1967).
72. W. S. Toothacker, L. E. Preuss, C. K. Bugenis, *Nature* **216** (No. 5112), 61 (1967).
73. C. K. Bugenis, L. E. Preuss, W. S. Toothacker, *Rev. Sci. Instr.* **39** (11), 1754 (1968).
74. Г. Б. Кук, К. Е. Меллиш, Дж. Пэйн, *Материалы II Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии*, доклад № 285, 1958 г; *Избранные доклады иностранных ученых*, т. 10, М., Атомиздат, 1959.
75. С. И. Лобов, В. А. Цукерман, *ПТЭ*, № 4, 164 (1963).
76. С. И. Лобов, *ПТЭ*, № 1, 180 (1969).
77. Л. Д. Данилин, Г. В. Закасовский, Н. И. Комяк, С. И. Лобов, А. И. Павлова-Веревкина, Р. И. Плотников, В. Н. Фунин, В. А. Цукерман, в сборнике «Аппаратура и методы рентгеновского анализа», вып. IV, Изд. СКБ рентгеновской аппаратуры, Л., 1969, стр. 137.
78. *Nuclear Techniques and Mineral Resources Proc. Symp.*, В.—А., November 1968, IAEA, Vienna, 1969.
79. А. И. Павловский, Г. Д. Кулешов, Г. В. Склизков, Ю. А. Зысин, А. И. Герасимов, *ДАН СССР* **160** (1), 68 (1965).